



不同耕作措施对黄土高原区域大豆根际土壤 微生物量、酶活性和养分的影响

林 玥^{1,2}, 郝嘉琪^{1,2}, 王维钰^{1,2}, 冯永忠^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘 要 选择免耕(NT)、秸秆覆盖(SM)、地膜覆盖(PM)和起垄覆膜(RPM)4种保护性耕作措施为研究对象,以传统耕作(CT)为对照,通过测定根际土与非根际土的微生物量、酶活性及养分质量分数,研究不同耕作措施对不同微域土壤碳氮质量分数及微生物特征的影响。结果表明:(1)土壤微生物量和酶活性均呈现根际>非根际的规律,且与对照相比,各保护性耕作处理均有提高。RPM和SM处理的根际土壤微生物碳质量分数分别提高51.78%和24.62%,微生物量氮的富集率则分别达到48.13%、46.04%;NT、SM、RPM处理的蔗糖酶活性较CT处理分别提高了113.35%、113.10%、74.75% ($P<0.05$);(2)4种不同保护性耕作措施的土壤养分质量分数均有提高,其中RPM和SM与CT相比差异显著,效果更加明显,并且有效降低了土壤pH。根际土壤的全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳质量分数均高于非根际土壤,各处理均表现出一定程度的富集,其中全氮和硝态氮的富集率以RPM处理最高,分别为16.9%和45.06%。(3)根际土壤的养分质量分数、酶活性以及微生物生物量之间的相关性程度高于非根际土壤,根际土壤中微生物量与酶活性之间存在着显著的正相关性,过氧化氢酶和蔗糖酶这2种酶均与养分间显著相关,而脲酶则无显著相关。综上,在黄土高原区域内,秸秆还田和起垄覆膜更有利于改良土壤理化性状和提高土壤生物学特性。

关键词 根际和非根际;土壤微生物量;土壤酶活性;土壤养分;黄土高原区域

中图分类号 S342.1

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2019)04-0620-11

土壤微生物是土壤生命活体的主要组成部分,参与了土壤发生发育的全过程,并为植物提供可利用的养分^[1]。土壤微生物量广义上的定义是体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的土壤中总生物量^[2],包括细菌、真菌、放线菌和一些小型动物等等。土壤微生物量促使土壤有机质和营养养分两者的转变和循环^[3],参与土壤中有机质的分解和腐殖质的形成。土壤微生物量碳、氮也被大量研究者作为体现土壤微生物活性和土壤肥力状况的一个重要指标^[4]。土壤酶主要来源于微生物、动植物残体及其代谢过程中产生的分泌物^[5],在土壤生态系统中发挥着积极的作用,在土壤营养物质转化、有机质分解等过程中扮演重要的角色^[6]。

根系是农田生态系统重要及地下组成部分,具有吸收、合成和储存养分及有机物的功能,是作物与土壤的动态界面^[7]。根际微生物在土壤生态

系统中物质循环和能量流动起重要作用,在参与养分循环的同时,也影响着土壤有机质的转化^[8-9]。同时,根际土壤酶的活性及种类同样决定土壤养分的利用情况,从而关系到作物对养分的吸收与利用^[10],由于根际土壤微生物及酶的作用所产生的根际效应使根际土壤养分状况发生变化^[11-12],有研究显示,植物根际对土壤养分具有“截留效应”,这种效应在土壤养分含量较贫瘠的区域内尤为明显^[13]。有研究指出不同农田管理措施能够影响土壤根际和非根际区域的微环境,进而影响土壤养分状况、土壤微生物及酶活性。昌龙然等^[14]的研究发现垄作免耕的方式可以显著增加根际土壤有机碳和颗粒有机碳的含量,有利于土壤有机碳组分的稳定;宋霄军等^[15]研究表明长期深松处理能够有效增加根际土壤的有机碳和全氮含量,提高根际土壤的 β -葡糖苷酶、 β -纤维

收稿日期:2019-02-04 修回日期:2019-03-11

基金项目:陕西省科技统筹计划(2016KTCL02-11)。

第一作者:林 玥,女,硕士研究生,研究方向为高效农作栽培制度。E-mail:linkyl230@126.com

通信作者:冯永忠,男,教授,主要从事农业区域发展与循环农业研究。E-mail:fengyz@nwsuaf.edu.cn

二糖苷酶等活性；也有研究者指出保护性耕作能够提高根际土壤真菌、细菌及放线菌的数量，并促进根际土壤磷酸酶及多酚氧化酶的活性^[16]。总体而言，研究不同农田管理措施对根际土壤养分循环、微生物特性及酶活性的影响，有利于进一步探究土壤养分，尤其是土壤碳氮与土壤微生物及酶活性的相互关系，对于阐述农田生态系统功能对农田管理措施的响应具有重要的意义。

黄土高原是世界最大的黄土沉积区，位于中国西北部地区，该地区是中国重要的农业区之一，一直以来人们对资源的长期不合理利用以及传统耕作技术的使用，使该区表层土壤结构疏松，严重制约了黄土高原旱区农业持续发展^[17]，采用合理的耕作措施，对于促进坡耕地的农业长远发展有重要意义。近年来，对该区域内土壤养分、微生物特性及酶活性影响的研究逐渐受到重视，但有关土壤微生物及养分特征的研究多集中在不同植被类型下^[18-19]，保护性耕作对根际土壤养分及生物学特性的研究尚不多见。本研究以传统耕作作为对照，选取免耕、秸秆覆盖、地膜覆盖和起垄覆膜 4 种保护性耕作措施，通过分析长期的保护性耕作之后的根际和非根际土壤微生物量、酶活性以及

土壤养分的变化趋势，探讨不同微域土壤对保护性耕作模式的响应，为黄土丘陵沟壑区运用合理的耕作方式，选择和评价保护性耕作措施，改善土壤环境和提高土壤养分效率提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站作为试验地，试验站地处于陕西省神木县六道沟小流域（110°21′~110°23′E，38°46′~48°51′N）。该流域地处黄土高原与鄂尔多斯高原的结合部，呈现片沙覆盖的黄土丘陵地貌，是晋陕蒙水蚀风蚀交错带强烈侵蚀中心，是非常典型的生态脆弱区。该流域面积为 6.9 km²，属于中温带半干旱气候，年平均气温为 8.4℃，无霜期为 169 d，历史平均降雨量为 437.9 mm，平均干燥度为 1.8，降雨多发生在每年夏季，其中 6 至 9 月降雨量占全年降雨量的 77% 以上，且多以暴雨形式出现。试验期间当地气候条件见图 1。

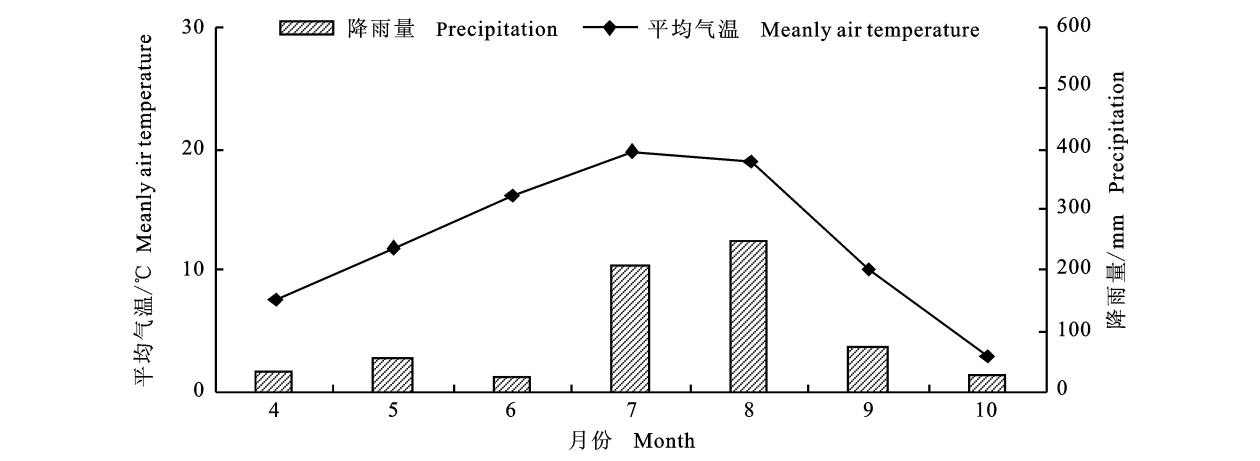


图 1 试验区气温与降雨量变化

Fig.1 Monthly changes of air temperature and precipitation in research area

1.2 试验设计

本试验属长期定位试验，始于 2008 年 5 月初，在试验开始前，当地农民在该地块内种植土豆，坡度为 12.5°（春季至秋季为农用地，冬闲期间为撂荒地）。该地 2008 年试验初始耕层土壤的基本性状如下：有机碳 3.73 g·kg⁻¹，全氮 0.50 g·kg⁻¹，全磷 0.44 g·kg⁻¹，全钾 6.70 g·kg⁻¹，碱解氮 10.56 mg·kg⁻¹，速效磷 3.10

mg·kg⁻¹，速效钾 62.90 mg·kg⁻¹。

采用随机区组设计，设置传统耕作（CT）、免耕（NT）、秸秆覆盖（SM）、地膜覆盖（PM）、起垄地膜覆盖（RPM）共 5 个处理（表 1）。每种处理各设 4 个重复小区，小区面积 1.5 m×15 m。供试大豆品种为“晋豆 21”，播种期为每年 4 月中旬（本研究为 2018-04-18 播种），大豆行距 20 cm，均匀撒播，生长过程中均不施用农药和化肥，其余田间

表 1 试验处理

Table 1 The description of treatments

处理 Treatment	描述 Description
传统耕作(CT) Conventional tillage	传统操作,翻耕 Traditional tillage
免耕(NT) No-tillage	土地免耕,不覆盖任何杂物 No tillage,no coverage with any debris
秸秆覆盖(SM) Straw-mulching	秸秆横向覆盖,还田量为 5 500 kg·hm ⁻² Traditional tillage,straw mulching,straw coverage with 5 500 kg·hm ⁻²
地膜覆盖(PM) Plastic mulching	地膜横坡平铺,局部覆土镇压,膜间种植 Ploughing and laying plastic mulch,turns the soil surrounding the plastic, then planting between the plastic
起垄地膜覆盖(RPM) Ridging and plastic mulching	在垄两侧播种,然后再用地膜覆盖整个垄上部分,垄沟不覆盖;垄顶中线与下一个垄顶中线之间间距 100 cm,垄高 30 cm Planting on both sides of ridge, then mulching on the entire ridge, no coverage on furrow; space between neighboring ridge top midlines 100 cm, ridge height 30 cm, planting crops on both sides of ridge

管理措施均依照当地常规田间管理。5 个处理均在同日播种,地膜覆盖和秸秆覆盖也在播种当日完成^[20]。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土样采集 2017 年 7 月采集根际与非根际土壤。采集时采用 S 形取样法在各处理试验小区内选取植株,挖取有完整根系的土体,采用抖落法收集根际土,轻轻抖动植株,落下不含根系的土壤视为非根际土,然后用软毛刷将根表面附着的不易抖落的土壤收集至样品袋中作根际土。将各小区的土壤样品混合均匀后放入保温箱,带回实验室过 2 mm 筛;部分土样保存于 4 ℃ 冰箱,用于测定土壤微生物生物量、硝态氮、铵态氮和土壤酶活性;另一部分室温风干后研磨,过 0.15 mm 筛,用于测定土壤全量养分。

1.3.2 土壤指标测定 使用半微量凯氏法测定土壤全氮(TN);采用重铬酸钾加热法测定有机碳(SOC);使用 KCl 浸提-流动分析仪法测定铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N);采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提后,通过 TOC 分析仪(TOC-L CPH CN-200,岛津)测定微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)。采用苯酚钠-次氯酸钠比色法^[21]测定土壤脲酶(Urease),酶活性以 24 h 每克土生成 NH₃-N 的毫克数表示;采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[21]测定土壤蔗糖酶(Invertase),酶活性以 24 h 每克土生成葡萄糖的毫克数表示;采用高锰酸钾滴定法^[21]测定过氧化氢酶(Catalase),酶活性用 1 h 每克土消耗的 KMnO₄ 体积数表示。

1.3.3 数据分析 采用 SPSS 22.0 软件对所得数据进行 ANOVA 方差分析、多重比较(Duncan’s)

和相关性分析,用 Origin 9.3 作图。

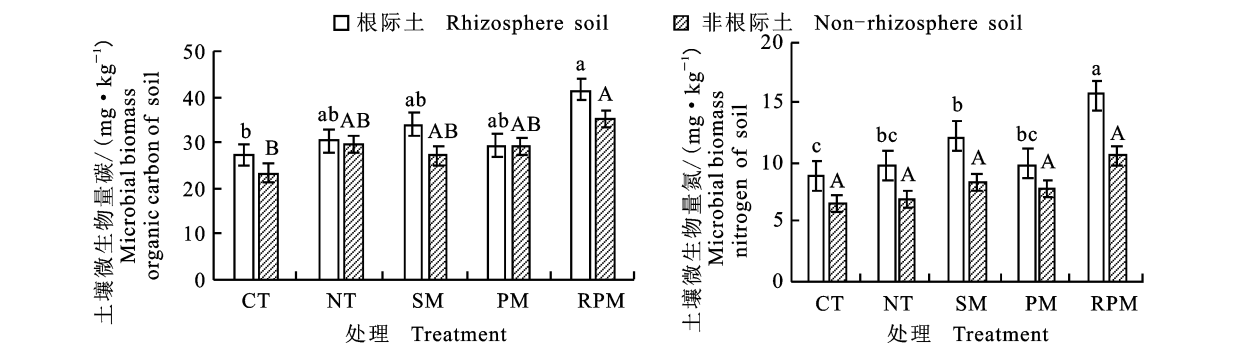
2 结果与分析

2.1 不同耕作处理土壤微生物量碳氮质量分数的差异

分析发现,各耕作处理方式下的土壤根际的微生物量碳、氮质量分数全部高于非根际土壤。从图 2 看出,与传统耕作(CT)相比,其他处理根际的土壤微生物碳质量分数显著提高($P<0.05$),其中,起垄覆膜(RPM)和秸秆覆盖(SM)根际的土壤微生物碳质量分数分别提高了 51.78%和 24.62%,非根际土壤中 4 种保护性耕作处理的微生物碳质量分数均高于 CT,体现为:RPM>NT>PM>SM>CT,除 RPM 之外各处理差异不明显。比较各耕作处理,RPM 的根际、非根际微生物碳质量分数总体高于其他各处理,呈现出良好的根际富集作用,富集率为 17.5%。从各处理土壤微生物氮质量分数分布来看:与传统耕作(CT)相比,RPM 和 SM 处理的根际土壤微生物量氮质量分数显著增加($P<0.05$),其中 RPM 处理和 SM 处理的富集率分别达到 48.13%和 46.04%。非根际土壤微生物量氮质量分数与根际的趋势相似,表现为 RPM>SM>PM>NT>CT。

2.2 不同耕作处理土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的差异

由图 3 可知,不同耕作措施下土壤酶活性存在一定差异,各处理根际土壤中保护性耕作农田的 3 种主要酶活性均高于非根际土壤。对于根际土壤而言,保护性耕作处理 NT、SM、RPM 较 CT



图柱上不同大写字母表示不同处理间非根际土差异显著性 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示不同处理间根际土差异显著性 ($P < 0.05$), 下同

Different capital letters mean the significant difference between different treatments in non-rhizosphere soil; different lowercase letters mean the significant difference between different treatments in rhizosphere soil, respectively. The significant levels is 0.05, the same below

图 2 不同耕作处理根际和非根际土壤微生物量碳、氮质量分数
Fig. 2 Mass fractions of soil microbial carbon and nitrogen biomass in rhizosphere and non-rhizosphere soil under different tillage treatments

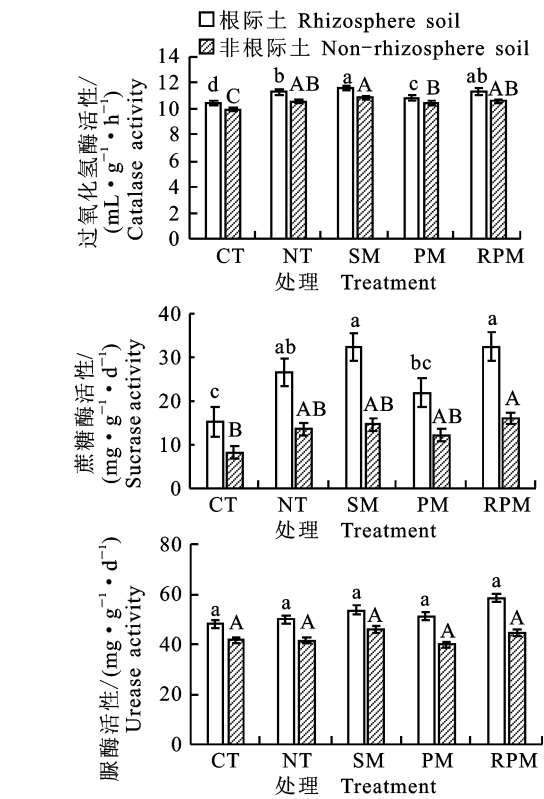


图 3 不同耕作处理根际和非根际土壤酶活性比较

Fig. 3 Soil enzyme activity in the rhizosphere and non-rhizosphere soils under different tillage treatments

处理均显著增强了过氧化氢酶和蔗糖酶活性 ($P < 0.05$), 其中 SM、RPM、NT 的过氧化氢酶活性分别提高了 10.63%、8.62%、8.08%, 蔗糖酶活性分别提高了 113.35%、113.10%、74.

75%。对于非根际土而言, SM、RPM、NT、PM 较 CT 处理均显著增强了过氧化氢酶活性, 增幅分别为 9.70%、6.79%、6.61% 和 5.09%; 然而, 仅 RPM 处理显著增强了非根际土蔗糖酶活性, 其余处理间差异均不显著; 与此同时, 不同处理间根际土和非根际土的脲酶活性差异均不大。

2.3 不同耕作措施对土壤碳氮质量分数和 pH 的影响

由表 2 和表 3 可以看出, 根际土壤的全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳质量分数均高于非根际土壤, 且各处理根际土壤对养分截存效应明显。而 pH 则表现为根际土壤低于非根际土壤。通过比较不同耕作处理下土壤全氮质量分数的差异得出, RPM 和 SM 处理不同微域的土壤全氮质量分数均显著高于传统耕作 ($P < 0.05$), 且各处理的根际土壤对土壤全氮质量分数均有一定的富集效果, 其中以 RPM 处理最高, 富集率为 16.9%, PM 处理最小, 为 5.52%。在根际微生境中土壤铵态氮质量分数表现为 $SM > RPM > NT > PM > CT$, 其中 SM 和 RPM 处理的质量分数均显著高于 CT 处理, 为 $5.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, SM 处理的富集程度同样为处理间最大, 较 CT 组提高 22.71%, 同时, RPM 和 SM 这 2 种处理方式都显著提高了非根际土壤中的铵态氮质量分数, 较 CT 处理分别提高 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而硝态氮质量分数在根际土壤中表现为: $RPM > SM > NT > PM > CT$, 其中 RPM 和 SM 处理与 CT 处理间差异均显著, 非根际土壤

有相似的趋势,硝态氮水平高低依次为 RPM>SM>PM>NT>CT。RPM 处理的有机碳质量分数在不同微域的土壤中均为最高,显著高于 CT 处理,分别高出 24.87%(根际)、29.94%(非根际),其次为 SM 处理,其有机碳质量分数同样显著高于 CT 处理。pH 方面,NT、SM、RPM

处理均显著降低根际土壤 pH,与此同时,仅 RPM 处理显著降低了非根际土的 pH。总体来说,与 NT 和 PM 处理相比,RPM 和 SM 处理对于根际和非根际土壤养分质量分数的提高和土壤肥力的增强均有更明显的效果,并且降低了土壤 pH。

表 2 不同耕作处理下根际与非根际土壤的养分质量分数与 pH($\bar{x} \pm s_x$)

Table 2 Mass fraction of nutrient and pH in rhizosphere and non-rhizosphere soils under different tillage treatments						
处 理 Treatment	部位 Position	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen	有机碳/ (g·kg ⁻¹) Organic carbon	pH
CT	根际 Rhizosphere	0.47±0.04 b	3.21±0.28 c	1.99±0.11 c	3.78±0.23 b	8.22±0.02 a
	非根际 Non-rhizosphere	0.44±0.02 B	2.68±0.15 C	1.74±0.03 A	3.24±0.08 B	8.32±0.01 A
NT	根际 Rhizosphere	0.51±0.03 ab	4.50±0.39 b	2.28±0.09 bc	4.10±0.13 b	8.16±0.03 bc
	非根际 Non-rhizosphere	0.46±0.00 B	3.21±0.24 BC	1.97±0.16 A	3.44±0.11 AB	8.29±0.03 AB
SM	根际 Rhizosphere	0.62±0.04 a	5.54±0.27 a	2.84±0.30 ab	4.71±0.07 a	8.13±0.01 c
	非根际 Non-rhizosphere	0.55±0.04 A	3.89±0.36 A	1.99±0.43 A	3.91±0.15 AB	8.26±0.04 AB
PM	根际 Rhizosphere	0.48±0.05 b	4.44±0.16 b	2.34±0.33 bc	4.06±0.18 b	8.20±0.01 ab
	非根际 Non-rhizosphere	0.45±0.01 B	3.42±0.10 AB	1.93±0.21 A	3.82±0.50 AB	8.27±0.01 AB
RPM	根际 Rhizosphere	0.64±0.05 a	4.75±0.22 ab	3.26±0.07 a	4.72±0.20 a	8.04±0.02 d
	非根际 Non-rhizosphere	0.54±0.03 A	3.95±0.10 A	2.25±0.18 A	4.21±0.12 A	8.21±0.04 B

表 3 不同耕作处理下土壤养分的富集率

Table 3 Enrichment rate of soil nutrient under different tillage treatments					%
处 理 Treatment	全氮 Total nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	有机碳 Organic carbon	
CT	6.86	19.68	14.68	16.70	
NT	10.81	40.19	16.01	19.10	
SM	12.84	42.39	42.64	20.46	
PM	5.52	29.99	21.43	20.46	
RPM	16.90	20.39	45.06	12.05	

2.4 根际和非根际土壤养分、微生物量及酶活性间的相关性

由表 4 可以看出,根际土壤养分与微生物量、酶活性之间的相关性程度高于非根际,说明根际范围内物质循环活动更加活跃。对于根际土壤而言,MBC 和 MBN 均与蔗糖酶、过氧化氢酶、NO₃⁻-N 和 SOC 间存在显著或极显著正相关,但也均与 pH 间存在显著或极显著负相关;同理,过氧化氢酶与蔗糖酶均与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 SOC 间存在显著或极显著正相关,但也均与 pH 间存在极显著负相关;TN 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、MBN 和过氧化氢酶间存在显著或极显著正相关,与 pH 间存在极显著负相关。对于非根际土壤而言,SOC 与 MBC 间、TN 与蔗糖酶及 NH₄⁺-N 间均存在极显著正相关,而 pH 与 TN、

SOC、NH₄⁺-N 间均存在显著或极显著负相关。

3 讨论

3.1 不同耕作措施对土壤根际微生物量的影响

土壤微生物生物量一般被看成是土壤活性有机物的一部分,作为土壤养分循环与周转的中间物质,尽管其仅占土壤有机质的很小一部分,但起的作用很大,在营养物质的转化和供应等过程中扮演重要的角色^[22]。土壤微生物量碳(MBC)和土壤微生物量氮(MBN)不仅是土壤微生物量的重要表征,同时也是有机碳灵敏指示因子和氮素矿化的重要组分^[23]。前人的研究表明,根际土壤受到根系的影响较大,由于根系代谢所分泌的碳水化合物是根际微生物的主要碳源和能量来源,使根际微区中的土壤获得了充足的有机物质和营

表 4 根际与非根际土壤养分、微生物量和酶活性的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil nutrients, microbial biomass and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils

项目 Item	微生物量碳 MBC	微生物量氮 MBN	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	全氮 TN	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	有机碳 SOC	pH
微生物量碳 MBC	1	0.768**	0.460*	0.593**	0.060	0.338	0.594**	0.190	0.521*	-0.508*
微生物量氮 MBN	0.387	1	0.472*	0.539*	0.073	0.682*0.634**		0.333	0.666**	-0.754**
过氧化氢酶 Catalase	0.245	-0.063	1	0.817**	0.297	0.472*0.668**		0.788**	0.606**	-0.626**
蔗糖酶 Invertase	0.202	0.441	0.364	1	0.393	0.4020.675**		0.717**	0.514*	-0.639**
脲酶 Urease	0.462*	0.410	0.075	0.117	1	0.1390.302		0.143	0.057	-0.506*
全氮 TN	0.351	0.330	0.459*	0.616**	0.347	10.489*		0.457*	0.531*	-0.590**
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.239	0.350	0.024	0.243	0.125	0.1471		0.442	0.510*	-0.687**
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.386	0.165	0.744**	0.381	0.142	0.7200.064		1	0.542*	-0.398
有机碳 SOC	0.626**0.114		0.306	0.285	0.327	0.501*0.287		0.559*	1	-0.542*
pH	-0.314	-0.294	-0.237	-0.419	0.109	-0.604*0.096		-0.582*±0.458*		1

注：“*”表示在 0.01 水平显著相关，“*”表示在 0.05 水平显著相关。右上方为根际土壤养分和酶活性间的相互关系，左下方为非根际土壤养分和酶活性间相互关系。

Note:“*” indicates a significant difference at 0.01 level;“*” indicates a significant difference at 0.05 level, respectively. The top-right of table showed the correlation analysis between soil nutrients with enzymes ability in rhizosphere soil, and bottom-left of table showed the correlation analysis between soil nutrients with enzymes ability in non-rhizosphere soils, respectively.

养物质,进而使根际土壤的微生物量增大^[24]。本研究表明,不同耕作方式下根际土壤的 MBC 和 MBN 均比非根际高,体现出明显的根际正效应,与前人的研究结果基本一致^[25-26]。在本研究中,由于大豆生育期内未施用化肥,根际微生物活动所需的能量主要来源于作物根系代谢活动所释放的低分子量有机物和土壤中的养分^[26-27],CT 处理中根系代谢能力较弱,所释放的有机物质有限,除此之外根系自身的生长同样需要土壤中的养分,致使根际微生物数量降低,根际土壤 MBC 和 MBN 也均处于较低的水平。相反,RPM 和 SM 处理的根际微生物量显著性增高。这是因为秸秆在土壤腐解过程中释放有机质及其他营养物质,为土壤中微生物生长和繁殖给予了适宜的条件,刺激了微生物的生长,同时,秸秆覆盖下的表层土壤由于积累了大量来源于秸秆的有机质,能与外界进行物质和能量交换,为微生物提供了大量的碳源和能量,促进了土壤中微生物旺盛的活动^[28-29]。起垄覆膜的微生物量远高于覆膜处理的原因可能为在水土流失更易发生的坡耕地,起垄覆膜阻隔了土壤和大气之间的交换,减少了热量和水分的散失^[30]。充足的水分是影响微生物生长必须的环境条件之一,而起垄覆膜具有良好的蓄水保墒的效果,促进了微生物的生长活动,进而提高了土壤微生物量。

3.2 不同耕作措施对根际土壤酶活性的影响

土壤酶主要来源于土壤微生物的活动^[31],参与土壤肥力的形成和演化过程,是土壤中具有生物活性的蛋白质。土壤酶活性显著受到水分、温度等的影响。前人的研究结果已经表明,土壤酶活性的根际分布特征均表现为以植物根系为中心,向四周逐渐减小的变化规律,表现出根际土壤酶活性比非根际土壤更强的趋势^[32-33]。在本研究中,与非根际土壤相比,各处理根际土壤的脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶的活性均有所增强,这是由于根系分泌了大量有机物,这些分泌物有效促进了微生物的活动,使得根际微域中有更多更丰富的微生物存在,从而促进了根际土壤更频繁的物质交换活动^[34]。

通过分析不同处理间根际土壤土壤酶活性可知,RPM 和 SM 处理显著增强了根际土壤过氧化氢酶、蔗糖酶活性,该结果与前人的研究基本一致^[35-36]。相比常规耕作措施,秸秆还田和起垄覆膜具有较强的蓄水保墒能力,间接调控了土壤的酶活性,适宜的土壤水热条件提高了土壤微生物的代谢产酶能力,并最终引起土壤酶活性的提高^[37-38]。此外,由于秸秆还田后,为微生物供应额外的能源,提高了土壤微生物生物数量和微生物生物量的碳氮质量分数,同时也刺激了更多的包括土壤酶在内的一些分泌物的产生,从而大大提

高了土壤酶的活性^[39]。

3.3 不同耕作措施对土壤理化特性及其相关性的影响

前人对于秸秆还田、免耕、起垄覆膜等保护性耕作措施改良土壤理化性质,调节土壤水、肥、气、热之间关系等方面已经开展了大量的研究^[40-41],本研究同样表明,秸秆还田和起垄覆膜处理显著提高了土壤根际及非根际土壤碳氮质量分数,并降低了土壤 pH。

本研究发现,不同耕作处理下的植物根际土壤的全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳质量分数的富集水平有所区别。由于试验地处于水土资源和土地生产力破坏和损失较大的区域,土壤养分的质量分数较低,通过长期的保护性耕作措施,植物的根际效应更为明显。这主要是因为条件比较恶劣的环境下,植物需要吸收土壤中更多的养分以维持自身的正常生长^[42]。铵态氮和硝态氮作为土壤无机态氮的重要组成部分,是作物能够吸收利用的有效态氮。本研究认为,保护性耕作加速了土壤氮素矿化,尤其在根际范围内,使得硝态氮的质量分数均有升高且根际的升高更加明显,说明根际土壤能够富集一定量的无机氮素,这与多数研究结果一致^[42-43]。此外,本研究中不同耕作处理根际土壤的有效养分(硝态氮、铵态氮)的变化幅度高于全量养分,说明在土壤养分循环的过程中,有效态养分较全量养分对于根际的变化有着更加敏感的反应。

土壤微生物和酶共同影响土壤的相关物质转化和能量流动,是一个评估土壤肥力的重要相关性指标^[44]。很多研究认为土壤养分质量分数和酶活性以及微生物量之间普遍存在显著相关性^[45-46]。在本研究中,根际土壤中微生物量、酶活性以及养分指标间的相关性程度均高于非根际,这与刘钊等^[47]在黄土高原区域内研究结果基本一致。本研究中根际土壤 MBC 与 SOC 间、TN 与 MBN 间均存在显著相关性,与前人研究结果相近^[48]。而根际土壤过氧化氢酶与土壤氮素之间、蔗糖酶与土壤 SOC 间同样存在显著的相关性,说明土壤酶活性与土壤养分以及微生物量之间存在可能的专性作用^[49-50]。

4 结 论

在研究周期内,大豆根际土壤、微生物生物量、养分质量分数以及酶活性均高于非根际,存在

良好的根际正效应,且不同保护性耕作措施提高了大豆根际土壤对碳氮质量分数的富集率,更有助于大豆地下部生长及养分吸收利用。同时,相比非根际土壤,根际土壤中酶活性、微生物量以及土壤养分具有显著的相关性,说明微生物量碳氮、过氧化氢酶及蔗糖酶对于该试验区域的土壤养分具有较好的指示作用。此外,长期保护性耕作措施能够提高土壤根际和非根际微生物量碳氮及酶活性,酸化土壤,促进土壤养分,其中以秸秆还田和起垄覆膜的效果最为明显。总体而言,在黄土高原区域内,秸秆还田和起垄覆膜更有利于改良土壤理化性质和提高土壤生物学特性。

参考文献 Reference:

- [1] 王传杰,肖 婧,蔡岸冬,等.不同气候与施肥条件下农田土壤微生物生物量特征与容量分析[J].中国农业科学,2017,50(6):1067-1075.
WANG CH J,XIAO J,CAI A D,*et al.* Capacity and characteristics of soil microbial biomass under various climate and fertilization conditions across China croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2017,50(6):1067-1075.
- [2] 杨 凯,朱教君,张金鑫,等.不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J].生态学报,2009,29(10):5500-5507.
YANG K,ZHU J J,ZHANG J X,*et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29(10):5500-5507.
- [3] 王长庭,龙瑞军,王启兰,等.放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应[J].生态学报,2008,28(9):4144-4152.
WANG CH T, LONG R J, WANG Q L,*et al.* Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpinemeadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2008,28(9):4144-4152.
- [4] 汪 娟,蔡立群,毕冬梅,等.保护性耕作对麦-豆轮作土壤有机碳全氮及微生物量碳氮的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(7):1516-1521.
WANG J,CAI L Q,BI D M,*et al.* Effects of conservation tillage on the SOC,TN,SMBC and SMBN in two wequence rotation systems with spring wheat and pea[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2009,28(7):1516-1521.
- [5] 李 鑫,马瑞萍,安韶山,等.黄土高原不同植被带土壤团聚有机碳和酶活性的粒径分布特征[J].应用生态学报,2015,26(8):2282-2290.
LI X,MA R P,AN SH SH,*et al.* Characteristics of soil organic carbon and enzyme actives in soil aggregates under different vegetational zone on the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2015,26(8):2282-2290.
- [6] 梁国鹏,吴会军,武雪萍,等.施氮量对夏玉米根际和非根际

- 土壤酶活性及氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1917-1924.
- LIANG G P, WU H J, WU X P, *et al.* Soil nitrogen content and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere of summer maize under different nitrogen application rates [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1917-1924.
- [7] PREGITZER K S. Woody plants, carbon allocation and fine roots [J]. *New Phytologist*, 2003, 158(3): 421-424.
- [8] PRESTON-MAFHAM J, BODDY L, RANDERSON P F. Analysis of microbial community functional diversity using sole-carbon-source utilisation profiles — a critique [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, 42(1): 1-14.
- [9] 徐文静, 靳晓东, 杨秋生. 植物根际微生物的影响因素研究进展[J]. 河南农业科学, 2014, 43(5): 6-12.
- XU W J, JIN X D, YANG Q SH, *et al.* Research progress on factors influencing plant rhizosphere microorganism [J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2014, 43(5): 6-12.
- [10] MORRIS R A, GARRITY D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients [J]. *Field Crops Research*, 1993, 34(3-4): 319-334.
- [11] BARTH R C, KLEMMEDSON J O. Shrub-induced spatial patterns of dry matter, nitrogen, and organic carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(5): 804-809.
- [12] MA B, ZHOU Z, ZHANG C, *et al.* The character of phosphorus concentrations in rhizosphere soil of super-xerophytic shrubs [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3): 106-110.
- [13] 弋良朋, 马 健, 李 彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3565-3571.
- YI L P, MA J, LI Y, *et al.* Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3565-3571.
- [14] 昌龙然, 谢德体, 慈 恩, 等. 稻田垄作免耕对根际土壤有机碳及颗粒态有机碳的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(11): 49-53.
- CHANG L R, XIE D T, CI E, *et al.* Effect the soil organic carbon and particulate organic carbon in the rhizosphere on ridge and no-tillage under rice field [J]. *Journal of South-west China Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 37(11): 49-53.
- [15] 宋霄军, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1588-1597.
- SONG X J, WU H J, WU X P, *et al.* Long-term conservation tillage improves surface soil carbon and nitrogen content and rhizosphere soil enzyme activities [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(6): 1588-1597.
- [16] 黄召存, 陈 娇, 熊 瑛, 等. 保护性耕作对蚕豆根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 79-85.
- HUANG ZH C, CHEN J, XIONG Y, *et al.* Effects of conservation tillage on soil microbes and enzyme activity in rhizosphere of broad bean [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 79-85.
- [17] SUN L, WANG S, ZHANG Y, *et al.* Conservation agriculture based on crop rotation and tillage in the semi-arid Loess Plateau, China: Effects on crop yield and soil water use [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 67-77.
- [18] 李 静, 蔚晓燕, 唐 明. 黄土高原纸坊沟流域不同植物对土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(2): 387-393.
- LI J, WEI X Y, TANG M, *et al.* Effects of different plants on soil microbial biomass and enzyme activities in zhifang-gou watershed of Loess Plateau [J]. *Acta Botanica Boeali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2): 387-393.
- [19] 张海涵, 唐 明, 陈 辉. 黄土高原典型林木根际土壤微生物群落结构与功能特征及其环境指示意义[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2432-2437.
- ZHANG H H, TANG M, CHEN H, *et al.* Characterization of soil microbial community function and structure in rhizosphere of typical tree species and the meaning for environmental indication in the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(8): 2432-2437.
- [20] 曹 雪. 黄土高原坡耕地不同耕作措施水土保持效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- CAO X. Soil and water conservation effect of different tillage measures on sloping farmland in the Loess Plateau [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. Soil Enzyme and Its Research Methods [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [22] ANDERSON J P E, DOMSCH K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils [J]. *Soil Science*, 1980, 130(4): 211-216.
- [23] 戴建军, 宋朋慧, 闫暮春, 等. 不同种植方式对苗期大豆, 玉米根际土壤酶活性及微生物量碳, 氮的影响[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(2): 17-22.
- DAI J J, SONG P H, YAN M CH, *et al.* Effect of different cropping patterns of soybean and maize seedlings on rhizosphere soil enzyme activities and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(2): 17-22.
- [24] 王温澎, 邵 云, 李英臣, 等. 华北平原 4 种主要农作物非根际和根际土壤活性碳氮和酶活性特征[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 13(5): 77-84.
- WANG W P, SHAO Y, LI Y CH, *et al.* Labile carbon and nitrogen content and correlative enzyme activities of rhizosphere and non-rhizosphere soils under four major crops in North China Plain [J]. *Journal of Henan Normal University*

- sity (*Natural Science Edition*), 2018, 13(5): 77-84.
- [25] 任卫东, 贾莉洁, 王莲莲, 等. 长期施肥对小麦、玉米根际和非根际土壤微生物量碳及水溶性有机碳含量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(12): 145-151.
- REN W D, JIA L J, WANG L L, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon and water soluble organic in bulk and rhizosphere soils under long-term fertilization regimes in loess soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(12): 145-151.
- [26] 芦思佳, 韩晓增, 张 迪, 等. 长期施肥对大豆根际微生物量碳、氮的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(3): 495-498.
- LU S J, HAN X Z, ZHANG D, *et al.* Effect of long-term fertilization microbial biomass C and N in soybean rhizosphere [J]. *Soybean Science*, 2009, 28(3): 495-498.
- [27] 李东坡, 陈利军, 武志杰, 等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1891-1896.
- LI D P, CHEN L J, WU ZH J, *et al.* Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1891-1896.
- [28] 毛海兰, 付 鑫, 赵丹丹, 等. 秸秆与地膜覆盖条件下旱作玉米田土壤氮组分生长季动态[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 246-254.
- MAO H L, FU X, ZHAO D D, *et al.* Seasonal dynamics of soil nitrogen fractions in dry-land spring maize field under straw and plastic film mulching [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 246-254.
- [29] 伍玉鹏, 彭其安, SHAABAN M, 等. 秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 175-183.
- WU Y P, PENG Q A, SHAABAN M, *et al.* Research progress of effect of straw returning on soil microorganism [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(29): 175-183.
- [30] 刘恩科, 姜春霞, 黄学芳, 等. 覆膜方式对土壤环境及玉米产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(27): 46-52.
- LIU E K, JIANG CH X, HUANG X F, *et al.* Study on soil environment and maize yield under different plastic film mulching modes [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(27): 46-52.
- [31] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 12-21.
- WANG L D, WANG F L, GUO CH X, *et al.* Review: progress of soil enzymology [J]. *Soil*, 2016, 48(1): 12-21.
- [32] 安婷婷, 侯小畔, 周亚男, 等. 氮肥用量对小麦开花后根际土壤特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3352-3364.
- AN T T, HOU X P, ZHOU Y N, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer rates on rhizosphere soil characteristics and yield after anthesis of wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3352-3364.
- [33] 李俊华, 沈其荣, 褚贵新, 等. 氨基酸有机肥对棉花根际和非根际土壤酶活性和养分有效性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 277-284.
- LI J H, SHEN Q R, ZHU G X, *et al.* Effects of application amino acid fertilizer on soil enzyme activity and available nutrients in cotton rhizosphere and bulk soils [J]. *Soils*, 2011, 43(2): 277-284.
- [34] 孙敬克, 李友军, 黄 明, 等. 不同耕作方式对冬小麦生育期根际土及非根际土壤酶活性的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2007, 28(2): 59-62.
- SUN J K, LI Y J, HUANG M, *et al.* Effects of different tillage on rhizosphere and non-rhizosphere soil enzyme activity of winter wheat at different developing stages [J]. *Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 28(2): 59-62.
- [35] GU X B, CAI H J, DU Y D, *et al.* Effects of film mulching and nitrogen fertilization on rhizosphere soil environment, root growth and nutrient uptake of winter oilseed rape in northwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 194-203.
- [36] PENG C, LAI S, LUO X, *et al.* Effects of long term rice straw application on the microbial communities of rape-seed rhizosphere in a paddy-upland rotation system [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557: 231-239.
- [37] LUO Y J, WANG Z F, GAO M, *et al.* Effects of conservation tillage on organic carbon, nitrogen and enzyme activities in a hydric anthrosol of Chongqing, China [J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 30-36.
- [38] 张英英, 蔡立群, 武 均, 等. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 1-7.
- ZHANG Y Y, CAI L Q, WU J, *et al.* The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 1-7.
- [39] 李玉洁, 王 慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939-948.
- LI Y J, WANG H, ZHAO J N, *et al.* Effects of tillage methods on soil physicochemical properties and biological characteristics in farmland: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 939-948.
- [40] TAN C J, CAO X, YUAN S, *et al.* Effects of long-term conservation tillage on soil nutrients in sloping fields in regions characterized by water and wind erosion [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17592.
- [41] 杨 凯, 冯永忠, 李永平, 等. 黄土高原坡耕地不同耕作措施对土壤温度和水分的作效应[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 190-195.
- YANG K, FENG Y ZH, LI Y P, *et al.* Effect of different cultivation measure on soil temperature and moisture in

- the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 190-195.
- [42] 陈海滨, 马秀丽, 陈志彪, 等. 南方稀土矿区水土保持植物根际土壤碳氮及 pH 特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1334.
- CHEN H B, MA X L, CHEN ZH B, *et al.* Carbon, nitrogen and pH in rhizosphere of soil-water conserving plants in rare earth mining area in south China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1334.
- [43] 詹爱媛, 薛梓瑜, 任 伟, 等. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 59-66.
- ZHAN A Y, XUE Z Y, REN W, *et al.* Characteristics of nitrogen content between rhizosphere and bulk soil under seven shrubs in arid desert area of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 59-66.
- [44] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- ZHAO Y L, GUO H B, XUE ZH W, *et al.* Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [45] 张星杰, 刘景辉, 李立军, 等. 保护性耕作方式下土壤养分、微生物及酶活性研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 542-546.
- ZHANG X J, LIU J H, LI L J, *et al.* Effects of different conservation tillage on soil microbes quantities and enzyme activities in dry cultivation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(3): 542-546.
- [46] 赵海燕, 徐福利, 王渭玲, 等. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J]. *生态学报*, 2015, 35(4): 1086-1094.
- ZHAO H Y, XU F L, WANG W L, *et al.* Soil nutrients and enzyme activities in Larix principis-rupprechtii plantations in the Qinling mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 1086-1094.
- [47] 刘 钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 705-713.
- LIU ZH, WEI T X, ZHU Q K, *et al.* Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils in forests of Loess hilly region[J]. *Soil*, 2016, 48(4): 705-713.
- [48] ZHANG C, LIU G, XUE S, *et al.* Rhizosphere soil microbial properties on abandoned croplands in the Loess Plateau, China during vegetation succession [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 50: 127-136.
- [49] ZHANG C, LIU G, XUE S, *et al.* Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2011, 161(34): 115-125.
- [50] 叶协锋, 杨 超, 李 正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 445-454.
- YE X F, YANG CH, LI ZH, *et al.* Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 445-454.

Effects of Different Tillage Measures on Soil Microbial Biomass, Enzyme Activities and Nutrients in Rhizosphere Soil of the Loess Plateau

LIN Yue^{1,2}, HAO Jiaqi^{1,2}, WANG Weiyu^{1,2} and FENG Yongzhong^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Province Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract To explore the effect of tillage measures on carbon and nitrogen content, and microbial characteristics in rhizosphere soil, four conservation tillage measures, including no-tillage (NT), straw mulching (SM), plastic mulching (PM), and ridging and plastic mulching (RPM), were selected as subjects in this study, while conventional tillage (CT) was used as a control. We determined the microbial biomass, enzyme activity and nutrient content in rhizosphere and non-rhizosphere soil. The results showed: (1) The rhizosphere soil had higher microbial biomass and soil enzyme activity than non-rhizosphere soil, and conservation tillage treatments had the same tendency compared with the control. In rhizosphere soil, the mass fraction of microbial biomass organic carbon increased by 51.78% in RPM and 24.62% in SM, and the enrichment rate of microbial biomass nitrogen reached 48.13% in RPM and 46.04% in SM; The enzyme activity of rhizosphere soil in NT, SM, RPM increased by 113.35%, 113.10%, and 74.75%, respectively ($P < 0.05$). (2) The soil nutrient mass fraction increased in four conservation tillage managements. Especially, RPM and SM had significant-

ly higher nutrient mass fraction than the control CT, and the soil pH was effectively reduced. The total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and organic carbon in the rhizosphere soil were higher than those in the non-rhizosphere soil, and each treatment showed enrichment to a certain extent. The RPM had the highest enrichment rate, 16.9% for total nitrogen and 45.06% for nitrate nitrogen mass fraction, respectively. (3) The correlation between the indexes of rhizosphere soil was higher than that of non-rhizosphere soil. There was a significant positive correlation between microbial biomass and enzyme activity in rhizosphere soil. Both catalase and sucrase were correlated with soil nutrients, with the exception of urease. In summary, in the Loess Plateau region, ridging and plastic mulching is conducive to improving soil physical and chemical properties and improving soil biological characteristics.

Key words Rhizosphere and non-rhizosphere; Soil microbial biomass; Soil enzyme activities; Soil nutrients; Loess Plateau region

Received 2019-02-04 **Returned** 2019-03-11

Foundation item Shaanxi Provincial Science and Technology Coordination Plan (No. 2016KTCL02-11).

First author LIN Yue, female, master student. Research area: efficient farming system. E-mail: linky1230@126.com

Corresponding author FENG Yongzhong, male, professor. Research area: agricultural regional development and circular agriculture. E-mail: fengyz@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑:成 敏 **Responsible editor: CHENG Min**)